

高等學校教學用書

機 輪 氣

上 冊

Г. С. ЖИРИЦКИЙ 著

史 紹 熙
王 紹 祖 譯

高等教育出版社

高等學校教學用書



氣 輪 機

上 冊

Г. С. 日利茨基 著
史紹熙 王紹祖 譯

高等教育出版社



本書係根據蘇聯國立動力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 1948 年出版的日利茨基 (Г. С. Жирицкий) 教授著“氣輪機”(Газовые турбины) 譯出的。

這本書是一本有系統的氣輪機教程，其中包括氣輪機裝置的熱力學原理，各種氣輪機的熱過程和熱計算，氣輪機主要零件的構造和強度計算以及各種氣輪機構造的簡述。

本書適合氣輪機工程師和設計師以及動力高等學校、機器製造高等學校和航空高等學校學生的應用。

全書共有十二章，中譯本分上下兩冊出版，係由天津大學史紹熙、王紹祖合譯。

氣 輪 機

上 冊

書號320(課297)

日 利 茨 基 著

史 紹 熙 王 紹 祖 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版

北 京 琉 璃 廠 一 七 〇 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

新 華 書 店 總 經 售

京 華 印 書 局 印 刷

北 京 南 新 華 街 甲 三 七 號

開本 850×1168 1/32 印張 8 1/2 插頁 1 字數 194,000

一九五五年五月北京第一版

印數 1—2,500

一九五五年五月北京第一次印刷

定價 (8) 1.25 元

序

氣輪機早就著稱於世了。但是它作為一個獨立的單位應用於工業，只是最近十年內才開始。並且目前固定式，船舶用和機車用的氣輪機裝置為數還很少，而祇是在航空方面作為特別高速的新式發動機，它獲得了廣泛的應用並且已經有了成批的生產。

即使在陸地上的動力界裏面，氣輪機應用的範圍無疑義地也將要迅速地逐年擴大。

氣輪機的原理和構造在許多方面是與蒸汽輪機的原理和構造相似的。至今氣輪機在工業上幾乎還沒有應用，因此，自然也就幾乎沒有關於這種發動機的獨立文獻。祇是在大冊的蒸汽輪機教程中(斯圖多拉(Стодола)弗流吉爾(Флюгеля))以不多的章節用來講解氣輪機。

必須指出，蘇聯科學在創立氣輪機原理的方面起着主導的作用。В. М. 馬可夫斯基(В. М. Маковский)教授所著的“內燃式輪機的研究試驗”(1925年)以及應特別指出的 В. В. 烏瓦羅夫(В. В. Уваров)教授的著作“氣輪機”(1935年)都是世界文獻中最淵博的氣輪機專論著作，其中包含許多問題的理論研究，而這些問題在現今還具有現實的意義。

但是這些書還不是詳盡無遺的氣輪機指南，所以現在對於一個學習氣輪機的人來說，應當首先研究蒸汽輪機教程，以便能順利地理解關於氣輪機的文獻。

本書是系統地闡述氣輪機原理和構造的首次嘗試著作。它可以作為高等學校學生的教學參考書和氣輪機工程師及設計師的指南。

本教程相當大的部分是根據蒸汽輪機的理論和實驗材料，但

是有許多問題是僅關於氣輪機的，而這些問題盡可能地與輪機的一般原理及計算聯系起來。

在本書中詳細地分析了氣輪機裝置的循環——熱力循環及實際循環；闡明了氣體流動的原理，着重注意了具有內部損耗的過程並考慮到氣體的供應速度；研究了在葉片上的能量轉變及葉片的外形製作（其中還包括“長”的葉片）；分析了各種不同修改形式的氣輪機的級的熱過程和熱計算；注意了多級輪機，它們的原理和計算；研究了輪機在變化的工作情況時的熱過程和熱計算。

進行熱計算既用分析法，也用熵圖。繪製了空氣和燃燒產物的 $I-S$ 圖，這種圖的廣泛流行使我們以後能轉為只按照這種圖來進行計算。

在論及氣輪機構造的章節中，給出了輪機主要零件構造的一些為數還不多的例子和葉片、轉盤及軸的足夠詳盡的計算。

在這些章節中闡明了葉片冷卻的問題；給出了考慮到熱應力的轉盤計算，和考慮到轉盤陀螺運動效應的軸計算，這種效應在常製成具有懸臂樑式軸的氣輪機中有重要的意義。

由於氣輪機在航空方面應用得很廣，所以在本書中對於這些航空用輪機的計算和構造予以應有的注意。

由上述顯然可見，本書的內容符合於本書的書名：這是一本“氣輪機”教程，而不是“氣輪機裝置”教程，氣輪機裝置在本書中是只從方案和循環的觀點來論述的。氣輪機裝置的一些輔助單位（壓縮機、燃燒室、熱交換器）應在專門的文獻中闡明，特別是關於壓縮機的文獻已經有相當充分的創作。

我在編書時所利用的參考書籍列於書末。主要的書籍是：1) 由我編輯的集體著作“蒸汽輪機” 2) B. B. 烏瓦羅夫教授著的“氣輪機”。

嘉桑航空學院的氣輪機教研組的組員們，工程師：Л. Б. 阿爾

其舍夫斯基(Л. Б. Артишевский), А. Ф. 札哈羅夫(А. Ф. Захаров), В. И. 洛卡依(В. И. Локай), М. К. 馬克蘇托娃(М. К. МаксUTOBA), 和 З. Г. 施紹娃(З. Г. Шишова)都曾在我的編寫工作中給我以重要的幫助。我對所有這幾位都表示謝意。我還感謝 А. В. 夸斯尼可夫(А. В. Квасников)教授,他在評閱本書時,曾作出許多有價值的指示。

Г. 日利茨基

符 號

$A = \frac{1}{427}$ ——功的熱當量, 千卡/千克米; 各種不同的係數。

C ——離心力, 千克; 各種不同的係數。

E ——彈性模數, 千克/平方厘米。

G ——輪機的氣體消耗量, 千克/秒。

G_{ym} ——通過密封和間隙的漏氣量, 千克/秒。

H_0 ——絕熱的熱量降落值, 千卡/千克, 千卡/千克分子。

H_i ——利用於輪機內部的熱量降落值, 千卡/千克, 千卡/千克分子。

H_u ——燃料的熱值, 千卡/千克。

I ——氣體的焓, 千卡/千克分子; 轉動慣量, 厘米⁴。

L_0 ——輪機的有效功, 千克米/千克。

L_i ——輪機內部的功, 千克米/千克。

L_i^{am} ——輪級內部的功, 千克米/千克。

L_K ——壓縮機內部的功, 千克米/千克。

L_A ——葉片間的(環間的)功, 千克米/千克。

L_0 ——1 千克氣體的絕熱功, 千克米(絕熱過程的功)。

L_0^m ——輪級的絕熱功, 千克米/千克。

L_{01} ——相當於噴嘴內絕熱熱量降落值的功, 千卡/千克。

L_{02} ——相當於葉片間絕熱熱量降落值的功, 千卡/千克。

L_p ——輪機的可用功, 千克米/千克。

M ——力矩, 千克厘米。

N_0 ——輪機的有效功率, 馬力。

N_i ——輪機的内部功率, 馬力。

N_K ——機械阻力的功率, 馬力。

N_{ms} ——消耗於轉盤摩擦和通氣損耗的功率, 馬力。

P ——力, 千克。

P_A ——葉片上的軸向力, 千克。

- P_u ——葉片上的圓周方向的力, 千克。
 Q ——熱量, 千卡/ 千克分子; 力; 千克。
 R ——氣體長數, 千克米/ 千克度; 半徑。
 S ——氣體的熵, 千卡/ 千克分子度。
 T ——絕對溫度, $^{\circ}\text{K}$; 振動週期, 秒; 振動時的動能。
 U ——內能, 千卡/ 千克分子; 葉片斷面的周界長度, 米。
 V ——燃燒室容積, 立方米。
 W ——斷面係數, 厘米³。
 Z_0 ——排出的損耗, 千克米/ 千克。
 Z_A ——工作葉片間的損耗, 千克米/ 千克。
 Z_H ——導向葉片間的損耗, 千克米/ 千克。
 Z_c ——噴嘴內的損耗, 千克米/ 千克。
 Z_{me} ——轉盤摩擦和通氣的損耗, 千克米/ 千克。
 Z_{gm} ——漏氣損耗, 千克米/ 千克。
 M ——陀螺力矩。
 a ——導溫係數, 平方米/ 小時; 各種不同的係數。
 b ——葉片寬度; 各種不同的係數。
 c ——氣體速度, 米/ 秒; 各種不同的係數。
 c_0 ——氣體的初速度, 米/ 秒。
 c_1 ——氣體由噴嘴流出的實際速度, 米/ 秒。
 c_{1t} ——氣體由噴嘴流出的理論速度, 米/ 秒。
 c_2 ——氣體由葉片流出的絕對速度, 米/ 秒。
 c_{30} ——聲速, 米/ 秒。
 c_K ——氣體的臨界速度, 米/ 秒。
 c_p ——等壓比熱, 千卡/ 千克度。
 c_v ——等容比熱, 千卡/ 千克度。
 d ——輪機輪子的直徑(也是其他零件的直徑)。
 d_i, d_i ——氣體消耗量, 千克/ 馬力小時(對輪機裝置的有效功率或內部功率而言)。
 f ——橫斷面的面積。
 f_1 ——噴嘴出口斷面的面積, 平方米。
 f_{1a} ——垂直於輪機軸線的噴嘴出口斷面面積, 平方米。
 f_{2a} ——垂直於輪機軸線的葉片出口斷面面積, 平方米。

- $f_{\min}$ ——擴張噴嘴的最小橫斷面面積，平方米。
 g ——重力加速度米/秒²，或厘米/秒²。
 h ——相當於葉片環圈的功的熱量降落值，千卡/千克；高度。
 h_g ——排出損耗，千卡/千克。
 h_i ——被利用的〔內部的〕熱量降落值，千卡/千克。
 h_{11} ——工作葉片間的能損耗，千卡/千克。
 h_n ——速度級導向葉片間的能損耗，千卡/千克。
 h_0 ——一級內可用的〔絕熱的〕熱量降落值，千卡/千克。
 h_{01} ——噴嘴內絕熱的熱量降落值，千卡/千克。
 h_{02} ——葉片間絕熱的熱量降落值，千卡/千克。
 h_c ——噴嘴內的能損耗，千卡/千克。
 h_{me} ——因轉盤摩擦和通氣的能損耗，千卡/千克。
 h_{ym} ——因漏氣的能損耗，千卡/千克。
 i_0 ——氣體〔在進入輪機以前〕起初的烔，千卡/千克。
 i_1, i_2 ——氣體最後的實際烔，千卡/千克。
 i_{1t}, i_{2t} ——氣體在絕熱膨脹終了時的烔，千卡/千克。
 k ——縮小係數；傳熱係數；各種不同的係數。
 l ——軸和其他零件的長度。
 l_1 ——噴嘴的高度。
 l_2 ——工作葉片的高度。
 l_n ——冠的司輪導向葉片的高度。
 $l_{\min}$ ——理論上燃燒所必需的空氣量，千克/千克。
 m ——質量，各種不同的係數。
 n ——每分鐘內的轉數〔轉速〕。
 p ——氣體壓力，千克/平方米或絕對大氣壓。
 p_0 ——氣體在進入輪機以前的壓力，絕對大氣壓或千克/平方米。
 p_1 ——噴嘴後面的氣體壓力，絕對大氣壓或千克/平方米。
 p_2 ——葉片後面的氣體壓力，絕對大氣壓或千克/平方米。
 p_k ——氣體的臨界壓力，絕對大氣壓或千克/平方米。
 q ——熱量千卡/千克。
 r ——氣體所佔容積部分；半徑。
 r_1 ——空氣所佔容積部分。

在第五章中
 及以後的各
 章中

r_g ——純燃燒產物所佔容積部分。

s ——氣體的熵, 千卡/千克度; 間隙, 壁的厚度。

t ——噴嘴和葉片的間距; 溫度, $^{\circ}\text{C}$; 時間, 秒。

u ——圓週速度, 米/秒; 氣體的內能, 千卡/千克; 周界長度。

v ——氣體的比容, 立方米/千克(其下標與壓力 p 的下標一致)。

w_1 ——氣體流進葉片時的相對速度, 米/秒。

w_2 ——氣體由葉片流出時的相對速度, 米/秒。

w_{2t} ——氣體由葉片流出時的理論相對速度, 米/秒。

x ——比值 $\frac{u}{c_1}$; 轉盤半徑。

y ——轉盤厚度; 比值 $\frac{w_2}{c_1}$; 撓度。

z ——噴嘴數目, 葉片數目, 級數。

α ——氣體絕對速度的傾角; 線膨脹係數; 恢復熱係數; $\varepsilon \frac{x-1}{x}$ 。

α_1 ——噴嘴中心線的傾角。

α_2 ——氣體由葉片流出時絕對速度的傾角。

α_θ ——由葉片壁對冷却空氣的放熱係數, 千卡/平方米, 小時, 度。

α_t ——由氣體對葉片壁的放熱係數, 千卡/平方米, 小時, 度。

β ——氣體相對速度的傾角; 數字係數。

β_1 ——氣體流進葉片的相對速度的傾角。

β_2 ——氣體由葉片流出的相對速度的傾角。

γ ——氣體的比重, 千克/立方米; 各種不同的角度值。

δ ——間隙, 各種不同的係數。

ε ——壓縮比(壓力增高比); 延伸率; 部分度; 各種不同的係數。

ε_r ——徑向延伸率。

ε_t ——切線方向延伸率。

ϑ ——轉子直徑對葉片高度的比。

ξ ——噴嘴內的能量損耗係數。

η ——效率; 動力粘度, 千克-秒/平方米。

η_1 ——燃燒室效率。

η_e ——輪機的實際效率。

η_k ——壓縮機的效率。

- η_M ——機械效率。
 η_{0e} ——輪機的相對實際效率。
 η_{0i} ——輪機的相對內部效率。
 η_{0A} ——輪機環圈的效率。
 η_i ——理想過程的效率(熱效率)。
 κ ——絕熱指數。
 λ ——多變指數;振動的圓頻率,秒⁻¹;導熱係數。
 μ ——分子重量;速度能的利用係數。
 ν ——運動粘度;平方米/秒;振動頻率,循環/秒;白松係數。
 ν_k ——氣體的臨界壓力比。
 ρ ——反作用度。
 σ ——回熱度;材料內的應力。
 τ ——溫度差;切線方向的應力。
 ξ ——工作葉片間的能量損耗係數;徑向的增加長度。
 ξ_n ——寇的司輪導向葉片間的能量損耗係數。
 φ ——噴嘴的速度係數;各種不同的角度。
 ψ ——工作葉片的速度係數。
 ψ_n ——導向葉片的速度係數。
 ω ——迴轉的角速度;氣流的偏離角。
 Π ——勢能。
 Θ_n ——極轉動慣量,千克厘米秒²。
 Θ_0 ——赤道(Экваториальный)轉動慣量,千克厘米秒²。

上 冊 目 錄

序	1
符 號	iv
緒 論	1

第 一 章 關於氣輪機的概念

1. 單級氣輪機	4
2. 具有速度級和壓力級的輪機	11

第 二 章 氣輪機裝置

3. 廢氣輪機	18
4. 等壓燃燒的氣輪機裝置	19
5. 等容燃燒的氣輪機裝置	22
6. 組合式裝置(霍爾茲瓦斯·蕭里)	27
7. 閉式循環的氣輪機裝置	29
8. 氣輪機發展史簡述	31

第 三 章 氣輪機的循環

9. 等壓燃燒輪機的可用功	41
10. 等容燃燒輪機的可用功	45
11. 氣體的 TS -圖	49
12. 使用 TS 圖的例子	56
1. 氣體在進入輪機以前的溫度的確定法	56
2. 輪機中絕熱的熱量降落值和膨脹終結時氣體溫度的確定法	57
3. 由輪機排出氣體的實際溫度的確定法	58
13. 氣體的 IS -圖	59
使用 IS -圖的例子	65

14. 等壓燃燒輪機的理想循環	67
1. 絕熱壓縮	67
2. 等溫壓縮	74
3. 中間加熱(絕熱壓縮)	77
15. 等容燃燒的理想輪機循環(斯圖多拉循環)	79
1. 絕熱壓縮	79
2. 等溫壓縮	84
16. 理想循環的比較	88
17. 等壓燃燒輪機裝置的實際過程	90
1. 絕熱壓縮	92
2. 等溫壓縮	99
3. 具有中間冷卻和中間加熱的過程	100
18. 具有等容燃燒和絕熱壓縮的輪機裝置的實際過程	104
19. 輪機裝置的實際過程的比較	108
20. 壓力損耗對於裝置效率的影響	121
21. 冷卻損耗	124
22. 裝置種類的選擇	125

第 四 章 氣體流動原理及氣輪機的噴嘴

23. 氣體在噴嘴中的絕熱膨脹過程	127
24. 依據壓力比 $\frac{p_1}{p_0}$ 選擇噴嘴形狀	133
25. 氣體的實際流動過程	137
26. 氣體在噴嘴斜切段內的膨脹	149
27. 在不同於計算條件的條件下,氣體在噴嘴內的膨脹	158
1. 收縮噴嘴	158
2. 擴張噴嘴	162
28. 噴嘴試驗研究工作的結果	166
1. 流出的氣流方向	166
2. 噴嘴內能量損耗係數依噴嘴尺寸而變化的關係	167

3. 形成噴嘴的葉片外形對噴嘴速度係數的影響	169
4. 噴嘴表面性質	170
5. 氣體速度的影響	171
6. 在非計算情況下噴嘴速度係數的變化	174
7. 速度係數 φ 的選擇	177
29. 噴嘴和噴嘴環圈的計算	178
1. 噴嘴的計算	178
2. 噴嘴環圈(組)的計算	180
3. 擴張噴嘴計算例題	183
4. 噴嘴環圈的計算例題	184
30. 利用 IS -圖的噴嘴計算	187
31. 噴嘴的冷却	189
計算例題	194

第 五 章 葉片間氣體的功

32. 工作葉片間能量的轉變	198
33. 引起葉片間損耗的原因及其試驗研究	203
1. 氣體由噴嘴環圈向工作葉片過渡時和由工作葉片流出時, 氣流 橫斷面的突然變化	203
2. 吸氣作用	203
3. 葉片的進氣損耗	205
4. 葉片通道內的損耗	203
34. 影響葉片間損耗的參數和係數 ψ 的選擇	212
35. 葉片間氣體的功	214
36. 工作葉片高度和工作葉片輪廓的確定	216
37. 熱計算的特點和長葉片的輪廓確定法	221
38. 在與計算條件不同的情況下葉片間能量的轉變	236
39. 工作葉片的冷却	241

附 錄 空氣和燃燒產物的 IS -圖

緒 論

熱力和水力機械製成兩種類型：活塞式及輪葉式(輪機式)。輪葉式機器的機構照例比活塞式機器的簡單，至於就時間而言，製造輪葉式機器的念頭往往在其相應的活塞式機器的發明之前就有了。蒸汽輪機的雛型在遠古的時候就爲人所熟知[亞歷山大城的希倫(Герон Александрийского)的«Эолипилы»]；氣輪機的觀念和活塞式內燃機的觀念幾乎在同時(十七世紀)發生；水力發動機——水輪機——在一開始就做成輪葉式的，它越過了活塞式機器的階段。

然而，除了最後這一例子以外，所有熱力機械和水力機械在其發展的初期都先做成活塞式的，僅在最近的幾年中輪葉式機器才佔優先地位。

水力發動機在一開始就做成輪機式，是並不偶然的：由於這些機器的低速性質，所以即使在機器製造技術的發展水平還低的時候也可以成功地製造出來(水磨輪)。

輪葉式熱機——蒸汽輪機和氣輪機——不能在原始技術和低下科學水平的條件下順利地發展起來。這些機器只是在葉片的高速運動和蒸汽或氣體的高溫情況下才能有效地進行工作。事實上，只有在熱力學，力學和材料力學領域內一系列的重要問題獲得解決以後，才可能實際上合理地設計這些種機器。

因爲輪葉式機器比活塞式機器有許多優越之處，所以在這個世紀的初期，當輪葉式機器發展的有利條件被創造出以後，它就開始迅速排斥活塞式機器，結果使活塞式機器僅保留下很有限的應用範圍。

在大的熱力發電站中，蒸汽輪機已完全排斥了活塞式蒸汽機，甚至在不大的功率情況下蒸汽輪機也足能與活塞式蒸汽機相競爭；離心式泵除了高壓裝置以外，幾乎在所有場合下都代替了活塞式泵，離心式及軸流式（輪葉式）壓縮機已把活塞式壓縮機從中壓力及低壓力的領域內排斥出去。

只有內燃發動機大多還繼續製成活塞式的，雖然以輪葉式機器——氣輪機——代替活塞式內燃機的時機尚未成熟，但可以感到有這種代替的必要。

氣輪機的發展落後於其他類型的輪葉式機器，其原因（除了上述之外）在於它必須：1）在輪葉間氣體溫度很高（比蒸汽輪機的蒸汽溫度還要高）的情況下工作；2）有高的輪機相對效率和高的壓縮機效率^①；壓縮機是氣輪機裝置的一個幾乎不可缺少的部分。

僅在近幾年中，這些要求才充分實際地得到滿足，尤其是在使用期限不長的航空用裝置方面。現代的氣輪機可以在初溫為 600° — 700°C （在航空用氣輪機中，達到 800 — 850°C ）的情況下工作，並且當在溫度更高的試驗用模型上進行試驗時，得到了令人鼓舞的結果。輪機和壓縮機（軸流式）的相對效率達到 80 — 85% （輪機的效率甚至達到 90% ），這就使得氣輪機裝置有可能獲得堪與其他類型發動機相競爭的效率。

最初的工業類型的氣輪機是用作輔助單位的：用於帶動壓縮機來造成內燃機（固定式及船用柴油機，航空用發動機）增壓作用及帶動布朗-鮑維里公司（Brown & Boveri & Co）所製“韋洛克斯”（«Велокс»）蒸汽鍋爐的鼓風機。

① 輪機內氣體的有用功對理論循環內同量氣體的有用功之比叫做輪機的相對效率。

在理論循環內壓縮氣體時所消耗的功與實際壓縮氣體時所消耗的功之比叫做壓縮機的效率。

以後出現了一種輪機，利用某種工藝過程中的熾熱氣體，例如，利用提煉石油產品時的顧德利(Гудри)過程中的氣體。

最後，氣輪機開始用作動力裝置的主要發動機。在這類固定式裝置(現時為數還不多)中，應當指出瑞士的納沙德爾(Neuchâter)避彈室中的電力站，它用一個功率為15000千瓦的氣輪機。在運輸方面，氣輪機的機車已被製造出；第一個船用裝置已經做過多次成功的試驗。特別是氣輪機在航空方面已開始獲得廣泛的應用，裝有氣輪機或輪機-噴射式發動機的飛機曾在許多國家中用作軍用機並曾參與第二次世界大戰。

現在，氣輪機裝置本身的效率還不及內燃機的效率，也不及大型蒸汽動力站的效率。然而實際上完全有可能提高這種效率，無疑地，在最近數年中氣輪機應用的範圍將迅速擴大，遍及所有新的技術部門。

氣輪機在航空方面的應用有遼闊的前途，現今在航空方面，輪機-噴射式和氣輪機式(具有螺旋槳的)飛機比起裝置活塞式航空發動機的飛機來有許多重要的優點。

因此，在現今，對氣輪機研究的注意不應遜於其他類型的熱機。

可惜，氣輪機原理尚未研究得像蒸汽輪機的那樣完全，例如試驗數據很少，並且氣輪機的計算和設計的方法現在還須根據蒸汽輪機的相應資料。